

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-43-49>

УДК 633.11:528.8



ПРОГНОЗ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ (*TRITICUM AESTIVUM* L.) ПО ЗНАЧЕНИЮ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI

М.С. Зверьков , С.С. Смелова

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельскохозяйственного водоснабжения «Радуга»; 140483, Московская область, Коломенский городской округ, пос. Радужный, 33а, Россия

Аннотация. Отмечается, что урожайность является интегральным показателем состояния сельскохозяйственных земель. Технология дистанционного зондирования Земли эффективно используется для наблюдений за растениями в период вегетации. Значение спектрального вегетационного индекса NDVI может быть использовано для прогноза урожайности различных сельскохозяйственных культур. Цель исследований заключалась в прогнозе урожайности озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по значению вегетационного индекса NDVI. Научно-практическая значимость результатов исследований, полученных по представленной методике, может быть адаптирована для фенологических наблюдений и изучения продуктивности посевов *Triticum aestivum* L. в других условиях. Для прогноза использовался набор спектральных изображений спутника Sentinel-2 Европейского космического агентства. Расчеты выполнены в геоинформационной системе QGIS (ver. 3.28.1 «Firenze») и SAGA GIS9.3.1. По данным прогноза, урожайность *Triticum aestivum* L. составила $60,41 \pm 0,06$ ц/га, ошибка прогноза по сравнению с фактически полученной – 2,2%.

Ключевые слова: урожайность, пшеница, вегетационный индекс NDVI, прогноз, спутниковый снимок, дистанционное зондирование,

Формат цитирования: Зверьков М.С., Смелова С.С. Прогноз урожайности озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по значению вегетационного индекса NDVI // Природообустройство. 2025. № 2. С. 43-49. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-43-49>

Original article

FORECAST OF WINTER WHEAT YIELD (*TRITICUM AESTIVUM* L.) BY THE VALUE OF THE NDVI VEGETATION INDEX

M.S. Zverkov , S.S. Smelova

All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems “Raduga”; 140483, Moscow region, Kolomna city district, village Raduzhny, 33a, Russia

Abstract. It is noted that productivity is an integral indicator of the condition of agricultural lands. Earth remote sensing technology is effectively used to observe plants during the growing season. The value of the NDVI spectral vegetation index can be used to predict the yield of various crops. The purpose of the study was to predict the yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) based on the value of the NDVI vegetation index. The scientific and practical significance of the research results obtained using the presented methodology can be adapted for phenological observations and studying the productivity of *Triticum aestivum* L. crops. in other conditions. A set of spectral images from the Sentinel-2 satellite (European Space Agency) was used for the forecast. The calculations were performed in the geographic information system QGIS (ver. 3.28.1 “Firenze”) and SAGA GIS9.3.1. According to the forecast, the yield of *Triticum aestivum* L. was 60.41 ± 0.06 kg/ha, the forecast error compared to the actual one was 2.2%.

Keywords: yield, wheat, vegetation index NDVI, forecast, satellite image, remote sensing

Format of citation: Zverkov M.S., Smelova S.S. Forecast of winter wheat yield (*Triticum aestivum* L.) by the value of the NDVI vegetation index // Prirodobustroystvo. 2025. № 2. P. 43-49. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-43-49>

Введение. Урожайность является интегральным показателем состояния сельскохозяйственных земель. Это позволяет на его основе судить о плодородии почв, контролировать

количество вносимых в почву удобрений. Достоверная и своевременная информация о состоянии посевов и почвенного покрова, оценка качества и количества будущего урожая и, как следствие, прогноз цен на аграрную продукцию оказывают существенное влияние как на экономику отдельного региона, так и на мировую торговлю в целом. В этой связи актуальными являются исследования, результаты которых позволяют оперативно оценивать состояние сельскохозяйственных культур.

Технология дистанционного зондирования Земли эффективно используется для наблюдений за растениями в период вегетации. Исследователи используют разные расчетные индексы для мониторинга состояния посевов. Наибольшее распространение получили так называемые вегетационные индексы, которые вычисляются путем соотношения значений спектральных характеристик (длин волн) различного диапазона. В общем случае спектральные индексы представляют собой эвристически полученные функциональные зависимости от значений спектральной отражательной способности в различных спектральных диапазонах [1]. Наибольшее распространение получил Normalized difference vegetation index (NDVI) – нормализованный разностный вегетационный индекс [2]. Он рассчитывается по зависимости:

$$NDVI = \frac{I_{(x,y)}^{nir} - I_{(x,y)}^{red}}{I_{(x,y)}^{nir} + I_{(x,y)}^{red}},$$

где $I_{(x,y)}^{nir}$ и $I_{(x,y)}^{red}$ – значения спектральных характеристик в точке поля с координатой (x, y) в спектральных каналах Near-Infrared (NIR, ближний инфракрасный диапазон длин волн, 865 нм) и RED (видимое излучение, 665 нм) соответственно.

Пшеница является одной из основных зерновых культур в мире, обеспечивая реализацию условий продовольственной безопасности [3]. В работе [4] отмечается сильная корреляционная связь (0,70...0,89) между NDVI и урожайностью зерновых культур. Пиковые величины NDVI, которые авторы рекомендуют использовать для прогнозирования урожайности [5, 6]. По данным [7], достоверные прогнозы об урожайности озимой пшеницы можно получить, основываясь на данных NDVI, примерно за 40 дней до уборки урожая, что соответствует фенологическим фазам выхода в трубку-колошения. Ошибка прогноза не превысила 4,62...5,40%. Для посевов пшеницы значения NDVI в условиях Фейсалабада (Пакистан) были максимальными в период цветения (0,74...0,85), колошения и налива зерна (0,78...0,88) [8]. В условиях Орловской

области пиковые значения NDVI = 0,72 приходятся на фазу колошения [9]. Значения вегетационного индекса в фазу цветения для прогноза урожайности пшеницы предложено использовать [10, 11] в фазу налива зерна [12, 13]. Такой разброс данных во многом может быть объясним различиями в условиях выращивания и особенностью сортов. При этом для проведения исследований в каждом конкретном случае можно сформулировать гипотезу. Наибольшая продуктивность посевов, согласно этой гипотезе, будет определяться наилучшим состоянием культуры, которому соответствует максимальное (пиковое) значение NDVI.

Цель исследований: прогноз урожайности озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по значению вегетационного индекса NDVI.

Научно-практическая значимость результатов исследований заключается в том, что представленная в них методика может быть адаптирована для фенологических наблюдений и изучения продуктивности посевов *Triticum aestivum* L. в других условиях.

Материалы и методы исследований. Мелиорируемый участок расположен на землях АО «Северка» в Коломенском городском округе Московской области, в с. Шкинъ. В соответствии со схемой севооборота в 2024 г. на опытном участке площадью 11,05 га выращивали пшеницу озимую сорта Тимирязевка 150 (*Triticum aestivum* L.), оригинатор – ФГБНУ «Национальный центр зерна имени П.П. Лукьяненко». Для посева использовали семена репродукции ЭС (элитные семена, поставщик ООО «Щелково Агрохим»). Способ посева – рядовой с междурядьем 15 см; норма высева семян – 228 кг/га, глубина заделки семян – 4 см. Начало и конец посева – 21.09.2023 г. и 22.09.2023 г. соответственно. Весной внесены минеральные удобрения (аммиачная селитра, 34%, ФосАгро) в норме 150 кг/га. Начало и конец уборки – 26.07.2024 г. и 15.08.2024 г. соответственно. Учетная урожайность (хозяйственная) составила 59,10 ц/га.

Пиковая фаза вегетации – колошение и цветение растений. По фенологическим наблюдениям, эта фаза в среднем наступила примерно 10-15 июня, что соответствует биологическим срокам (фаза 51-69 по шкале Zadoks J.C.). Наиболее релевантные снимки – набор спектральных изображений спутника Sentinel-2 Европейского космического агентства на 12.06.2024 г. Для построения графика хода вегетационных индексов, изучения состояния посевов дополнительно использовались снимки на 03.04, 03.05, 30.05, 04.07, 17.07, 27.07, 16.08.

Расчет NDVI выполнен по методу микширования исходных геопривязанных растровых изображений ближнего инфракрасного (NIR, B08) и красного (RED, B04) областей спектра снимков Sentinel-2 с использованием программы QGIS (ver. 3.28.1 «Firenze»). Исходные растры имеют метаданные драйвера GDAL – GeoTIFF, тип данных – Byte (8-битное беззнаковое целое), система координат EPSG:4326 – WGS84. Векторизация итогового растра NDVI выполнена в среде геоинформационной системы SAGA GIS9.3.1. Оценка площадей выполнена с помощью функции геометрии полигонального объекта \$area.

На участке в поперечном направлении фиксируется зона эрозии, наблюдения за которой ведутся с 2020 г. Эта зона практически полностью засорена ежевником обыкновенным (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv). Период развития озимой пшеницы от восковой спелости до зрелости визуально отличается от периода начала вегетации посевов ярко-зеленым цветом. Это наблюдается на спутниковых снимках и в условиях *in situ*.

Потенциальная урожайность за счет поступления фотосинтетически активной радиации (ФАР) рассчитана по формуле А.А. Ничипоровича:

$$Y_{FAR} = \frac{\Sigma Q_{FAR} K}{10^5 q}, \quad (1)$$

где Y_{FAR} – урожайность абсолютно сухой растительной массы, т/га; ΣQ_{FAR} – количество приходящей ФАР за период вегетации культур, млрд ккал/га; K – запланированный коэффициент использования ФАР, %; 10^5 – перевод в тонны.

Урожайность стандартной влажности $Y_{ст.вл.}$ вычислена по формуле, т/га:

$$Y_{ст.вл.} = Y_{FAR} \frac{100}{(100 - w) \alpha}, \quad (2)$$

где w – стандартная влажность, %; α – отношение суммы абсолютно сухой биомассы, равной единице, к абсолютно сухой биомассе побочной продукции.

ФАР для оценки потенциальной продуктивности определена по формуле [14]:

$$\Sigma Q_{FAR} = C_s \Sigma S_i + C_D \Sigma D, \quad (3)$$

где ΣQ_{FAR} – суммарная ФАР; C_s – эффективный коэффициент перехода от дневных сумм прямой солнечной радиации S_i к дневным суммам прямой ФАР; $C_D \sim 0,57$ – коэффициент перехода от интегральной рассеянной радиации к рассеянной ФАР; D – рассеянная радиация.

Используя методику [14], справочные данные [15] и формулу (3), получили распределение суммарной ФАР с апреля по октябрь для условий

изучаемого участка (рис. 1). Накопленный посевами *Triticum aestivum* L. приход ФАР за период вегетации культуры составил 28,51 ккал/см².

Зная значения Y_{FAR} , $Y_{ст.вл.}$ и график хода вегетационного индекса NDVI, можно составить прогноз урожайности сельскохозяйственных культур. Для точного прогнозирования урожайности необходимо брать в расчет значение NDVI, приходящееся на момент пика созревания культуры, то есть максимальное значение. После векторизации растра для каждой фазы на протяжении вегетационного периода получен набор атрибутивных данных со значениями NDVI. Эти данные используются в прогнозе урожайности $Y_{пр}$ по зависимости:

$$Y_{пр,i} = f(NDVI_i(x_i; y_i); Y_{ст.вл.}), \quad (4)$$

где $NDVI_i$ – значение вегетационного индекса в векторизованном участке поля с координатами центра $(x_i; y_i)$.

Последовательно вычисляя значение урожайности $Y_{пр,i}$ в каждом векторизованном участке поля с координатами центра $(x_i; y_i)$, получают набор данных, размер которого соответствует исходному набору атрибутивной информации NDVI. Полученные значения $Y_{пр,i}$ используются для построения карты зон продуктивности поля.

Зональная статистика NDVI (медиана *median*, минимальные *min*- и максимальные *max*-значения) рассчитывалась в среде программы QGIS (ver. 3.28.1 «Firenze»). Обработка данных по методу группировки интервалов, расчета частот (с графиком накопления частот – интегральным%) и графическое оформление результатов исследования выполнены в электронных таблицах Microsoft Office Excel (ver. 16.10 Build 180124 (2018)). Уровень статистической значимости принят как 0,05, рассчитывались стандартное отклонение s и доверительный интервал медианы d .

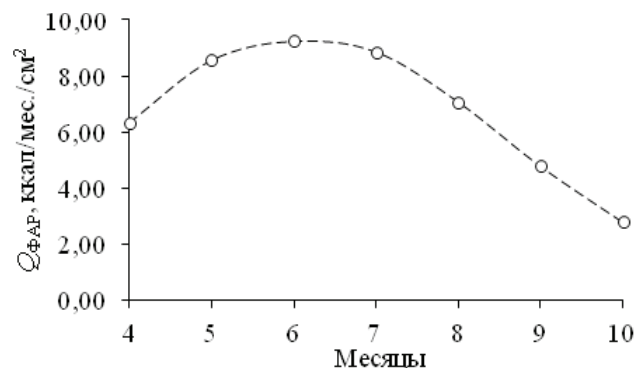


Рис. 1. Распределение суммарной фотосинтетически активной радиации (ФАР) с апреля по октябрь

Fig. 1. Distribution of total photosynthetically active radiation (PAR) from April to October

Наблюдение за метеорологическими параметрами на опытном участке организовано с помощью цифровой метеорологической станции Davis Vantage Pro26152CEU.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 2а показан график хронологического хода NDVI для *Triticum aestivum* L., на рисунке 2б – гистограмма распределения значений вегетационного индекса в пиковую фазу вегетации (колошение и цветение растений). В ряду данных NDVI не учитывали наблюдения за период от посева до начала кущения, так как эти фазы наступили осенью 2023 г. Вегетационный период 2024 г. начался рано; уже в первой декаде апреля среднесуточная температура воздуха была выше +5°C, а в отдельные дни, как, например, 6 апреля, – около 0°C. По данным расчета, в этот период медианные значения NDVI составили $0,23 \pm 0,03$ ($s = 0,06$; $max = 0,33$; $min = 0,13$). В целом эти значения свидетельствуют об удовлетворительной зимовке растений и о благоприятном прогнозе развития.

Со второй декады апреля и до конца месяца среднесуточная температура воздуха составляла примерно +10,5°C. В связи с тем, что до середины второй декады мая среднесуточная температура была в среднем +6,0°C при нижней границе амплитуды колебаний в сторону отрицательных значений в ночные часы, этот период характеризуется как экстремальный для посевов. Такие метеорологические условия вызвали задержку наступления следующих фенологических фаз и уборку примерно на 10-15 суток. Несмотря на это, к 3 мая (фаза 25 – середина кущения по шкале Zadoks J.C.) медианные значения NDVI составили $0,53 \pm 0,04$ ($s = 0,16$; $max = 0,82$; $min = 0,27$), к 20 мая (фаза 37 – появление флагового листа по шкале Zadoks J.C.,

задержка по причине заморозков) $median = 0,68 \pm 0,04$ ($s = 0,18$; $max = 0,89$; $min = 0,29$). К 30 мая ввиду роста среднесуточной температуры до +20,3°C, отсутствия осадков и среднесуточной испаряемости 176,2 мм растения *Triticum aestivum* L. находились в условиях стресса. В результате этого вегетационный индекс имел значения $median = 0,56 \pm 0,04$ ($s = 0,18$; $max = 0,91$; $min = 0,30$), что меньше, чем 10 днями ранее.

В период со 2 по 12 июня выпало 32,75 мм осадков, что благоприятно сказалось на посевах. К этому моменту наступила фаза колошения и цветения (59-61 по шкале Zadoks J.C.). Значения NDVI были максимальными за весь период наблюдений. Математическое ожидание NDVI составило, согласно расчетам, $0,83 \pm 0,05$. Дальнейшие наблюдения показывают постепенное снижение значения вегетационного индекса до минимального значения $median = 0,25 \pm 0,04$ ($s = 0,15$; $max = 0,71$; $min = 0,20$) в фазу полной спелости (91-93 по шкале Zadoks J.C.). Максимальные значения в этот период относятся к эродированному участку, засоренному *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.

Необходимо отметить, что уточнение ряда данных (исключение из расчета области, засоренной ежовником обыкновенным) в пиковую фазу вегетации не повлияло на значение NDVI, которое для прогноза принято $median = 0,83 \pm 0,05$.

По методике А.А. Ничипоровича потенциальная урожайность по приходу ФАР (3% использования) составила 72,79 ц/га при соотношении основной (зерно) и побочной (солома, корневые остатки и др.) продукции, соответственно, как 1:2 и стандартной влажности 14%. Прогнозная урожайность $Y_{пр}$ основной продукции составила $60,41 \pm 0,06$ ц/га ($s = 6,55$). Ошибка прогноза по сравнению с фактически собранным

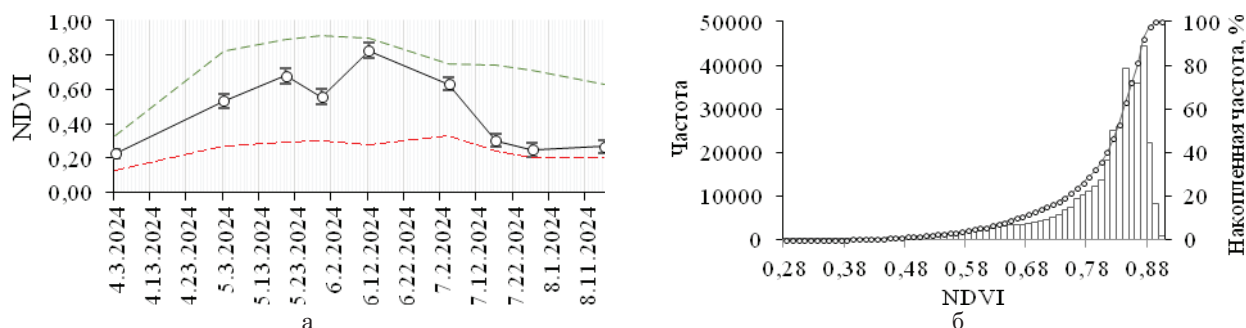


Рис. 2. График хронологического хода (а) и гистограмма за 12.06.2024 г. (б) значений NDVI для *Triticum aestivum* L. на опытном участке:

—○— — значения NDVI;
 --- и --- соответственно максимальные и минимальные значения NDVI

Fig. 2. Graph of chronological course (a) and histogram for 12/06/2024 (b) NDVI values for *Triticum aestivum* L. at the test site:

—○— — NDVI values; --- and --- — maximum and minimum NDVI values, respectively

зерном составила 2,2% ($< 10\%$). Коэффициент вариации равен 0,11, то есть статистически ряд данных характеризуется как достаточно однородный.

На рисунке 3 приведены карты NDVI (а) за 12.06.2024 г., рассчитанные на ее основе зоны продуктивности (б) и граница эрозионных процессов (в). Из анализа рисунков 3а и 3б следует, что флуктуации зоны пониженной продуктивности (< 30 ц/га) приурочены к разным частям

участка, при этом также наблюдаются в контуре эрозионного процесса, однако по площади составляют не более 0,03 га (0,30% от общей площади опытного участка). На более поздних снимках в фазе физической спелости визуализируются отличающиеся по окраске от основной части участка зеленые паттерны, связанные с засоренностью эродированного участка ежевником обыкновенным и отсутствием культурных растений пшеницы озимой (рис. 3в).

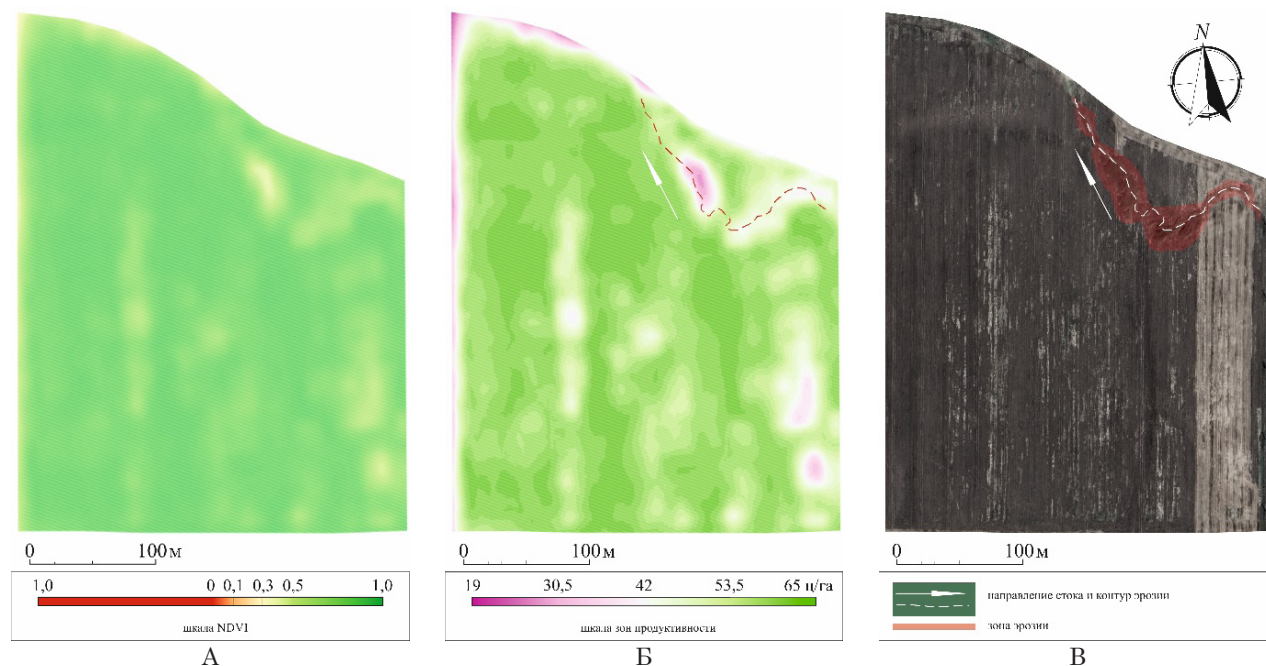


Рис. 3. Карты NDVI (А), зон продуктивности (Б), эрозионных процессов

Fig. 3. Maps of NDVI (A), productivity zones (B), erosion p

Выводы

В статье приводится результат прогноза урожайности пшеницы озимой сорта Тимирязевка 150 (*Triticum aestivum* L.) по данным вегетационного индекса NDVI, рассчитанного по методу микширования исходных геопривязанных растровых изображений ближнего инфракрасного (NIR, B08) и красного (RED, B04) областей спектра спутниковых снимков Sentinel-2. Прогнозная урожайность $Y_{пр}$ основной продукции составила $60,41 \pm 0,06$ ц/га. Ошибка прогноза по сравнению с фактически собранным зерном (фактической урожайностью) составила 2,2% ($< 10\%$). По данным ФГБНУ ВНИИ «Радуга», средняя урожайность озимой

пшеницы в богарных условиях в Московской области составляет 32,5 ц/га, по данным Росстата – 41,9 ц/га (рассчитана авторами данных исследований за период 2017-2023 гг.). По данным ФГБНУ ВНИИ «Радуга», урожайность пшеницы на орошении выше на 12,5 ц/га и составляет в среднем 40,9 ц/га.

Таким образом, на опытном участке получена урожайность выше средней по региону, что можно объяснить хорошей агротехникой и высоким продуктивным потенциалом сорта. С другой стороны, урожайность оказалась ниже обеспеченной ФАР, что в целом объяснимо сложными метеорологическими условиями вегетационного периода в 2024 г.

Список использованных источников

1. Черепанов А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. 2009. № 3. С. 28-32.
2. Hassan M.A., Yang M., Rasheed A., Yang G., Reynolds M., Xia X., Xiao Y., He Z. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform // Plant science: an international journal of experimental plant biology. 2019. Vol. 282. P. 95-103. DOI: 10.1016/j.plantsci.2018.10.022.
3. Becker-Reshef I., Vermote E., Lindeman M., Justice C. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data // Remote Sensing of Environment, 2010, vol. 114(6), P. 1312-1323. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.010.
4. Belmahi M., Hanchane M., Krakauer N.Y., Kessabi R., Bouayad H., Mahjoub A., Zouhri D. Analysis of Relationship between Grain Yield and NDVI from MODIS in the Fez-Meknes Region, Morocco // Remote Sensing, 2023, vol. 15(11). DOI: 10.3390/rs15112707.
5. Абдушаева Я.М. Оценка продукционного процесса растений озимой пшеницы по вегетационному индексу // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 2(119). С. 18-29. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-18-29.
6. Зверьков М.С. Анализ состояния орошаемых культур по данным дистанционного зондирования Земли с использованием спектрального индекса NDVI / М.С. Зверьков, С.С. Смелова // Экология и строительство. 2024. № 1. С. 24-34. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-01-004.
7. Ren J., Chen Z., Zhou Q., Tang H. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008. Vol. 10(4). P. 403-413. DOI: 10.1016/j.jag.2007.11.003.
8. Normalized difference vegetation index as a tool for wheat yield estimation: a case study from Faisalabad, Pakistan / Sultana S.R., Ali A., Ahmad A. et al. // The Scientific World Journal, 2014, 725326, 8 p. DOI: 10.1155/2014/725326.
9. Использование вегетативного индекса NDVI для прогноза урожайности зерновых культур / С.А. Родимцев, Н.Е. Павловская, С.В. Вершинин [и др.] // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 4(65). С. 56-67. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-65-4-56-67. EDN IRLXQG.
10. Duan T., Chapman S.C., Guo Y., Zheng B. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle // Field Crops Research, 2017. Vol. 210, P. 71-80. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.025.
11. Assessing Correlation of High-Resolution NDVI with Fertilizer Application Level and Yield of Rice and Wheat Crops Using Small UAVs / Guan S., Fukami K., Matsunaka H., et al. // Remote Sensing, 2019, vol. 11, 112. DOI: 10.3390/rs11020112.
12. Wheat Yield and Protein Estimation with Handheld and Unmanned Aerial Vehicle-Mounted Sensors / Walsh O.S., Marshall J.M., Nambi E. et al. // Agronomy 2023, vol. 13, p. 207. DOI: 10.3390/agronomy13010207.
13. Zsebő S., Bede L., Kukorelli G., Kulmány IM, Milics G., Stencinger D., Teschner G., Varga Z., Vona V., Kovács A.J. Yield Prediction Using NDVI Values from GreenSeeker and MicaSense Cameras at Different Stages of Winter Wheat Phenology // Drones. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 88. DOI: 10.3390/drones8030088.

References

1. Cherepanov A.S. Spectral properties of vegetation and vegetation indices / A.S. Cherepanov, E.G. Druzhinina // Geomatics. 2009. No. 3. P. 28-32.
2. Hassan M.A., Yang M., Rasheed A., Yang G., Reynolds M., Xia X., Xiao Y., He Z. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform // Plant science: an international journal of experimental plant biology. 2019. Vol. 282. P. 95-103. DOI: 10.1016/j.plantsci.2018.10.022.
3. Becker-Reshef I., Vermote E., Lindeman M., Justice C. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data // Remote Sensing of Environment, 2010, vol. 114(6), P. 1312-1323. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.010.
4. Belmahi M., Hanchane M., Krakauer N.Y., Kessabi R., Bouayad H., Mahjoub A., Zouhri D. Analysis of Relationship between Grain Yield and NDVI from MODIS in the Fez-Meknes Region, Morocco // Remote Sensing, 2023, vol. 15(11). DOI: 10.3390/rs15112707.
5. Abdushayeva Ya.M. Assessment of the production process of winter wheat plants by the vegetation index // Agro Eco Engineering. 2024. No. 2(119). P. 18-29. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-18-29.
6. M.S. Zverkov, Analysis of the state of irrigated crops according to remote sensing data using the NDVI spectral index / M.S. Zverkov, S.S. Smelova // Ecology and construction. 2024. No. 1. P. 24-34. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-01-004.
7. Ren J., Chen Z., Zhou Q., Tang H. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008. Vol. 10(4). P. 403-413. DOI: 10.1016/j.jag.2007.11.003.
8. Normalized difference vegetation index as a tool for wheat yield estimation: a case study from Faisalabad, Pakistan / Sultana S.R., Ali A., Ahmad A. et al. // The Scientific World Journal, 2014, 725326, 8 p. DOI: 10.1155/2014/725326.
9. The use of the NDVI vegetative index for predicting grain yields / S.A. Rodimtsev, N.E. Pavlovskaya, S.V. Vershinin [et al.] // Bulletin of the NGAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2022. No. 4(65). P. 56-67. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-65-4-56-67. EDN IRLXQG.
10. Duan T., Chapman S.C., Guo Y., Zheng B. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle // Field Crops Research, 2017. Vol. 210, P. 71-80. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.025.
11. Assessing Correlation of High-Resolution NDVI with Fertilizer Application Level and Yield of Rice and Wheat Crops Using Small UAVs / Guan S., Fukami K., Matsunaka H., et al. // Remote Sensing, 2019, vol. 11, 112. DOI: 10.3390/rs11020112.
12. Wheat Yield and Protein Estimation with Handheld and Unmanned Aerial Vehicle-Mounted Sensors / Walsh O.S., Marshall J.M., Nambi E. et al. // Agronomy 2023, vol. 13, p. 207. DOI: 10.3390/agronomy13010207.
13. Zsebő S., Bede L., Kukorelli G., Kulmány IM, Milics G., Stencinger D., Teschner G., Varga Z., Vona V., Kovács A.J. Yield Prediction Using NDVI Values from GreenSeeker and MicaSense Cameras at Different Stages of Winter Wheat Phenology // Drones. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 88. DOI: 10.3390/drones8030088.

14. Биоклиматический потенциал России: методы мониторинга в условиях изменяющегося климата / А.Д. Клещенко, Б.А. Черняков, О.Д. Сиротенко [и др.]; Под редакцией А.В. Гордеева. М: Типография Россельхозакадемии, 2007. 236 с.

15. Справочник агронома Нечерноземной зоны / под ред. Г.В. Гуляева. М.: Агропромиздат, 1990. 575 с.

Об авторах

Зверьков Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; ORCID: 0000000283484391; Scopus 57221661750; PИНЦ AuthorID: 751258; mzverkov@bk.ru

Смелова Светлана Станиславовна, канд. биол. наук, доцент, старший научный сотрудник; ORCID: 0009000917170026; Scopus 6504283625; PИНЦ AuthorID: 651060; smelova_svetlana@mail.ru

14. Bioclimatic potential of Russia: methods of monitoring in a changing climate / A.D. Kleshchenko, B.A. Chernyakov, O.D. Sirotenko [et al.]; Edited by A.V. Gordeev. Moscow: Printing House of the Russian Agricultural Academy, 2007. 236 p.

15. Handbook of the agronomist of the Non-Chernozem zone / edited by G.V. Gulyaev. Moscow: Agropromizdat, 1990. 575 p.

About the authors

Mikhail S. Zverkov, CSc (Eng), senior researcher; ORCID: 0000000283484391; 57221661750 Scopus; RSCI authorid: 751258; mzverkov@bk.ru

Svetlana St. Smelova, CSc (Bio), associate professor, senior researcher; ORCID: 0009000917170026; 6504283625 Scopus; RSCI authorID: 651060; smelova_svetlana@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Зверьков М.С., Смелова С.С. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

The authors declare no conflict of interests / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / The authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 21.01.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 26.02.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 26.02.2025

M.S. Zverkov, S.S. Smelova carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.